

基于路径选择法的 Ti-6Al-4V 钛合金微动疲劳寿命预测

门豪杰¹ 牛志强¹ 邓 瑛² 周文龙¹ 陈国清¹ 付雪松¹ 盖鹏涛²

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024)

(2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要:【目的】微动疲劳广泛存在于许多工程部件中,并且极有可能严重缩短部件的使用寿命。由于微动疲劳问题的复杂性,目前尚未有统一的适用于不同微动疲劳条件的疲劳寿命预测方法。针对基于点法和多轴疲劳准则的路径选择法(Path Selection Method, PSM),验证其在不同微动疲劳条件下对 Ti-6Al-4V 材料的疲劳寿命预测的适用性,是十分必要的。【方法】选取 Ti-6Al-4V 在柱-面接触构型和面-面接触构型下的 2 组微动疲劳试验数据,使用 PSM,结合 4 种多轴疲劳准则,对微动疲劳寿命进行预测,并与试验结果进行对比分析。【结果】结果表明,将根据 PSM 选择的预测寿命最短的路径作为点法的寿命预测路径,不仅适用于 Ti-6Al-4V 在面-面接触构型下的微动疲劳寿命预测,还能准确预测其他微动条件下的疲劳寿命。

关键词: 微动疲劳; 寿命预测; 临界距离理论; 多轴疲劳; 路径选择法

中图分类号: TH114 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.001

0 引言

微动损伤普遍存在于各类机械服役场景中,如螺纹管连接、螺栓连接、过盈配合的轴连接、花键连接、钢丝绳、架空导线、燃气涡轮机盘叶的榫结构连接等^{[1-2][3][179-190][4-7]}。多类工况条件下,构件受振动载荷作用,接触界面产生微米级切向微滑移,进而引发接触面微动磨损。当其中 1 个或多个部件受到振荡的体应力时,可能会在接触磨损区发生疲劳裂纹的萌生和扩展,甚至导致部件的断裂,这种微动损伤形式称为微动疲劳。微动疲劳损伤通常会显著缩短部件的运行寿命^[8],因此,对微动疲劳寿命的数值预测研究一直备受关注。而微动疲劳过程中伴随的微动磨损损伤极大提升了微动疲劳行为的复杂性,使得准确预测微动疲劳寿命面临巨大挑战。根据预测寿命时选取的损伤区域,目前流行的微动疲劳寿命预测方法大致可以分为 2 类:热点法和临界距离理论(Theory of Critical Distances, TCD)法。

热点法是指选择接触区表面损伤指标达到最大值的点所在的区域为寿命预测的损伤区域。由于在微动疲劳过程中,热点及其附近区域处于非比例的多轴应力状态,因此,部分研究者将多轴疲劳准则应用

于微动疲劳的寿命预测^[9-11]。Namjoshi 等^[12]⁹⁵⁵⁻⁹⁶⁴研究了在不同几何形状的摩擦副下,利用史密斯-沃森-托珀(Smith-Watson-Topper, SWT)准则、芬德利损伤参量(Findley Parameter, FP)准则和临界面最大切应力范围疲劳准则对 Ti-6Al-4V 的微动疲劳寿命预测,发现这些疲劳准则的预测准确性取决于摩擦副的形状和尺寸。Navarro 等^[13]在使用不同的多轴疲劳准则预测不同材料、接触构型和结构尺寸的试样的微动疲劳裂纹萌生寿命时,也发现了类似的问题。为了解决这一问题,Li 等^[14]提出一种与微动相关的损伤参数来修正多轴疲劳准则,修正后的疲劳准则与试验数据吻合较好。然而,Dini 等^[15]⁹⁵⁻¹⁰⁷的研究指出,热点法的局限性在于其作为一种局部方法,无法考虑应力梯度对微动疲劳寿命的影响。因此,提出了使用 TCD 法来预测微动疲劳寿命。

TCD 法最初由 Neuber^[17]在缺口疲劳寿命分析中提出,随后, Susmel^[18]对其进行了完善,并将其正式命名为 TCD 法。TCD 法在缺口疲劳强度和寿命预测中取得了良好效果^[19]¹⁷⁰⁶⁻¹⁷²⁴^[20-22]。区别于热点法, TCD 为非局部分析方法,该方法认为构件疲劳寿命不仅取决于热点应力,同时受热点周边区域应力场显著影响。

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975084); 国家科技重大专项(J2019-IV-0012-0080)

作者简介: 门豪杰,男,1993 年生,安徽亳州人,博士研究生; 主要研究方向为钛合金微动损伤的机制研究和数值分析; E-mail: 18840823549@163.com。

周文龙(通信作者),男,1965 年生,上海人,博士,教授,博士研究生导师; 主要研究方向为钛合金、铝合金等金属材料的微动磨损与微动疲劳性能的行为及机制研究; E-mail: wlzhou@126.com。

引用格式: 门豪杰,牛志强,邓瑛,等. 基于路径选择法的 Ti-6Al-4V 钛合金微动疲劳寿命预测[J]. 机械强度, 2026, 48(7): 1-11.

Men Haojie, Niu Zhiqiang, Deng Ying, et al. Prediction of fretting fatigue life of Ti-6Al-4V titanium alloy based on path selection method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 1-11.



免费获取

考虑到微动疲劳中由接触应力导致的应力集中区的应力状态与缺口疲劳相似^[23], Araújo 等^[16]^[95-107]将 TCD 与修正 Wöhler 曲线法 (Modified Wöhler Curve Method, MWCM) 相结合, 对 Al-4%Cu 和 Ti-6Al-4V 在柱-面构型下的微动疲劳极限进行了预测, 预测的准确度达到了 $\pm 20\%$ 。此后, TCD (主要是 TCD 中的点法) 与不同的多轴疲劳准则结合, 广泛应用于不同材料、构型和载荷条件下的微动疲劳寿命和极限预测^[3]^[179-190]^[24-25]^[26]^[23-31]^[27]^[28]^[105504]^[29]^[30]^[106895]^[31]。在早期的研究中, TCD 的路径选择并没有得到重视, 选取的路径通常为垂直于接触面的固定路径。近年来, 研究者开始尝试使用不同的路径来计算微动疲劳寿命。Vantadori 等^[32]使用点法, 分别沿着 3 条不同的路径 (垂直路径、 45° 倾斜路径和主应力方向路径), 对 2024-T351 铝合金柱-面构型下的微动疲劳寿命进行了预测, 但结果并不理想。鉴于微动疲劳裂纹萌生的取向性, Rangel 等^[33]使用 Araújo 等^[34]提出的临界方向法 (Critical Direction Method, CDM) 来确定点法的路径, 计算了 7075-T651 铝合金在柱-面构型下的微动疲劳寿命, 预测结果的准确性较高。Men 等^[35]^[109297]研究 Ti-6Al-4V 在面-面接触构型下的微动疲劳时, 设计一个新的路径选择法 (Path Selection Method, PSM) 来预测

其微动疲劳寿命, 也取得了较好的结果。PSM 中的路径选择与 CDM 类似, 根据不同的载荷条件选择不同的路径, 对于微动疲劳寿命的预测, 比固定路径法更具优势。

本文使用 PSM, 结合 4 种多轴疲劳准则, 对 2 组 Ti-6Al-4V 在不同微动疲劳条件下的寿命进行预测, 并与试验结果进行比较分析, 以验证 PSM 对 Ti-6Al-4V 微动寿命预测的适用性。

1 路径选择法

PSM 是由 Men 等^[35]^[109297]研究 Ti-6Al-4V 钛合金在完全接触下的微动疲劳寿命时提出的, 其示意图如图 1 所示。作为基于 TCD 和多轴疲劳准则的微动疲劳寿命预测方法, PSM 的寿命计算过程可分为 3 步: 第 1 步是计算热点区域的 FP 分布, 如图 1(a) 所示, 图 1(a) 中, D_{FP} 为 FP 标准的输出值; 第 2 步是使用 TCD 的点法, 迭代计算沿热点每条路径上的微动疲劳寿命 (迭代计算流程如图 2 所示), 汇总得到预测寿命区间 $[N_{f, \min}^{\text{pre}}, N_{f, \max}^{\text{pre}}]$ ($N_{f, \min}^{\text{pre}}, N_{f, \max}^{\text{pre}}$ 分别为预测寿命路径的角度取最小值和最大值时的预测寿命), 如图 1(b) 所示, 图 1(b) 中, L_M 为临界距离, θ 为预测寿命路径的角度, $N_{f, 0}^{\text{pre}}$ 为 θ 为 0° 时的预测寿命; 第 3 步是将预测寿命区间与

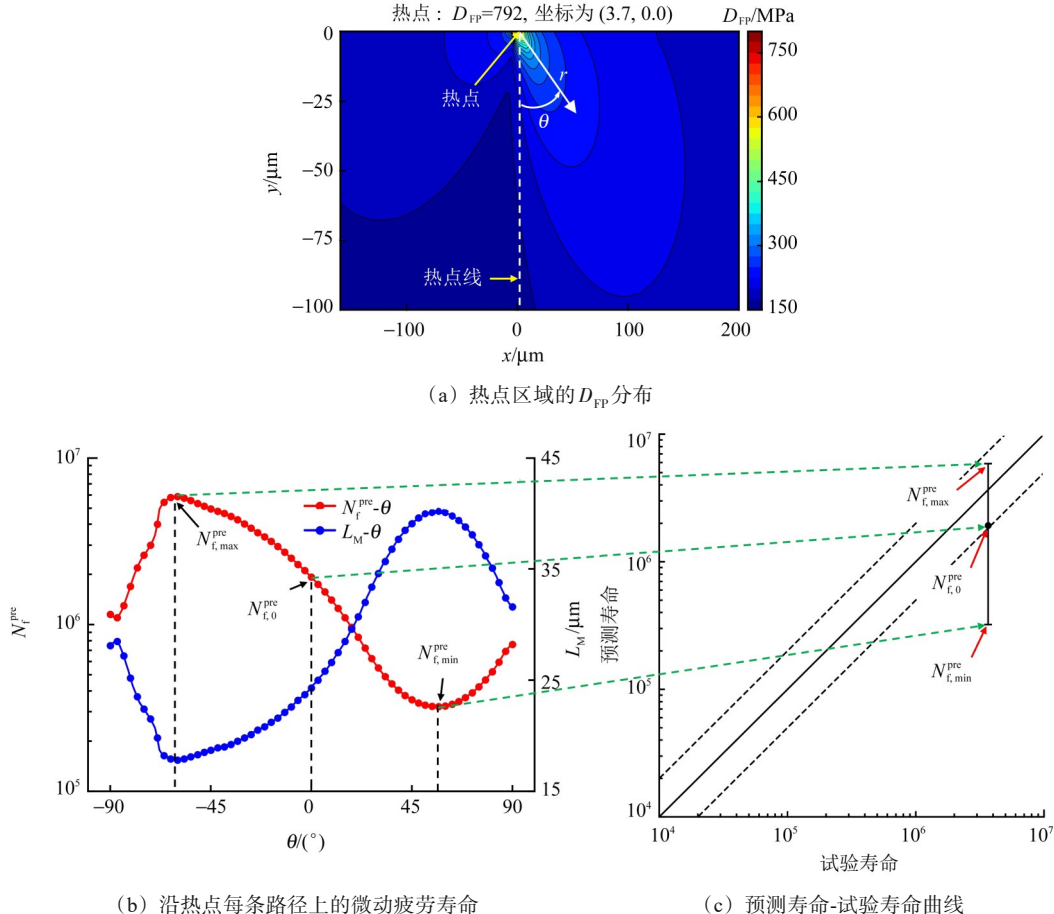


图 1 路径选择法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the path selection method

试验寿命进行比较[图 1(c)],从而确定最佳寿命预测路径。在文献[35]¹⁰⁹²⁹⁷中,对于 Ti-6Al-4V 在完全接触下的微动疲劳,确定的最佳路径为预测寿命最短的路径。

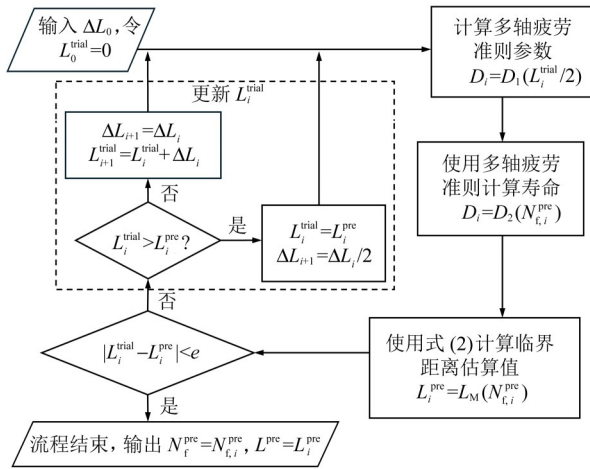


图 2 使用点法预测寿命的流程图

Fig. 2 Flow chart of the life prediction using the point method

图 2^{[35]109297}中, ΔL_0 为初始临界距离增量; ΔL_i 为第 i 步的临界距离增量; L_0^{trial} 为初始尝试临界距离; L_i^{trial} 为第 i 步的尝试临界距离; L_i^{pre} 为第 i 步预测的临界距离; e 为设定的误差限度; N_i^{pre} 为最终预测的寿命; $N_{i,i}^{\text{pre}}$ 为第 i 次迭代得到的预估疲劳失效循环次数; L^{pre} 为最终的临界距离; D_i 为第 i 步的损伤参量; D_1 为 $r = L_i^{\text{trial}}/2$ 处应力应变; 损伤参量 D 的计算式 $D = f(\sigma, \varepsilon)$, 其中 σ 为应力张量; ε 为应变张量; D_2 为损伤参量 D 与疲劳寿命 N 的关系式

$$D_{\text{FDP}} = g(N_f) \quad (1)$$

在使用点法迭代计算寿命时,需要确定临界距离 L_m 与疲劳寿命 N_f 的关系式,根据 TCD,其关系式^{[19]1706-1724}可表示为

$$L_m(N_f) = A_1 N_f^{A_2} \quad (2)$$

式中,参数 A_1 、 A_2 均为材料常数,需要通过一系列的缺口疲劳寿命曲线确定。在缺乏相关疲劳数据的情况下, A_1 和 A_2 的值可通过结合式(3)、式(4)^{[19]1706-1724}确定,即

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{\text{th}}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \quad (3)$$

$$L_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\text{IC}}}{\sigma_{\text{ut}}} \right)^2 \quad (4)$$

式中, L 为材料特征长度; ΔK_{th} 为疲劳裂纹扩展门槛值; $\Delta \sigma_0$ 为纯疲劳极限范围; L_s 为静态拉伸时的临界距离; K_{IC} 为平面应变下的断裂韧性; σ_{ut} 为抗拉强度。本文即通过此种方法确定 L_m 和 N_f 之间的关系式。

采用 4 个临界面多轴疲劳准则进行验证,分别为: SWT 准则、Fatemi-Socie(FS)准则、McDiarmid(MD)准则和 FP 准则,其模型如表 1 所示。表 1 中, D_{SWT} 、 D_{FS} 、

D_{MD} 分别为 SWT 准则、FS 准则、MD 准则的输出值; E 为材料的弹性模量; ν 为材料的泊松比; σ_y 为屈服强度; σ'_f 为应力-寿命方程(Basquin)方程中的疲劳强度系数; b 为应力-寿命方程中的疲劳强度指数; τ_r 为应力比 r 下的剪切疲劳极限; k 为系数; $\varepsilon_{n,a}$ 为正应变的应变幅; $\sigma_{n,\max}$ 为正应力的最大值; γ_a 为切应变的应变幅; τ_a 为切应力的应力幅。

表 1 所用的临界面多轴疲劳准则

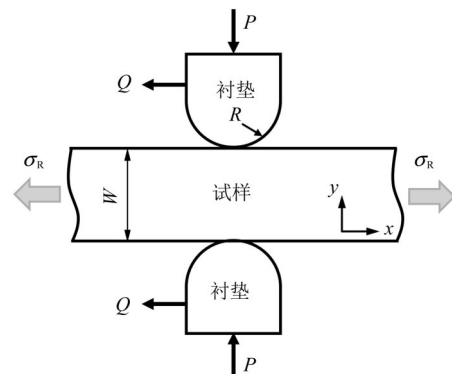
Tab. 1 Critical-plane multiaxial fatigue criteria adopted

模型	模型方程: $D = f(\sigma, \varepsilon) = g(N_f)$	临界面
SWT 准则	$D_{\text{SWT}} = \varepsilon_{n,a} \sigma_{n,\max} = \frac{\sigma'_f{}^2}{E} (2N_f)^{2b}$	$\max\{D_{\text{SWT}}\}$
FS 准则	$D_{\text{FS}} = \gamma_a \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} \right) = \frac{1+\nu}{E} \sigma'_f (2N_f)^b \left[1 + \frac{1}{2} (2N_f)^b \right]$	$\max\{D_{\text{FS}}\}$
MD 准则	$D_{\text{MD}} = \tau_a + \frac{\tau_r}{2\sigma_{\text{ut}}} \sigma_{n,\max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\tau_r}{2\sigma_{\text{ut}}} \right) \sigma'_f (2N_f)^b$	$\max\{D_{\text{MD}}\}$
FP 准则	$D_{\text{FP}} = \tau_a + k \sigma_{n,\max} = \frac{1}{2} (1 + k) \sigma'_f (2N_f)^b$	$\max\{D_{\text{FP}}\}$

目前,有 2 种方法可以得到多轴疲劳准则方程: ① 将多轴疲劳准则与单轴纯疲劳下得到的应力-寿命(Basquin)方程或应变-寿命(Manson-Coffin)方程相结合,从而得到多轴疲劳准则方程;② 直接通过拟合单轴疲劳数据的方法得到多轴疲劳准则方程。本文采用方法 1,建立的多轴疲劳准则方程如表 1 所示。

2 微动疲劳试验数据

选取几组来自现有文献的 Ti-6Al-4V 微动疲劳试验数据,以验证 PSM 在不同微动疲劳条件下的适用性。根据接触构型可将这些试验数据分为 2 组:第 1 组为柱-面接触构型,第 2 组为面-面接触构型。2 种接触构型的试样几何和加载条件如图 3 所示。图 3 中, σ_R 为反作用轴向载荷; σ_{axial} 为轴向循环载荷; Q 为切向载荷; R 为摩擦副半径; P 为法向载荷; B 为摩擦副宽度; W 为试样宽度。



(a) 柱-面接触构型

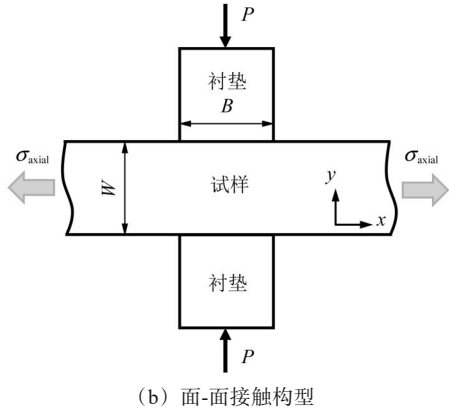


图3 不同接触构型下微动疲劳试验的试样和载荷条件示意图
Fig. 3 Sketches of specimens and load conditions for fretting fatigue tests with different contact configurations

2.1 柱-面接触

第1组(G1)为Ti-6Al-4V钛合金在柱-面接触下的微动疲劳试验数据,分别来源于Bellecave等^{[36]23-34}、Ferry等^{[26]23-31}和Cardoso等^{[37]106087}的研究工作,试验详情和微动疲劳试验结果分别如表2、表3和表4所示。3个文献中的微动疲劳试验均使用固定的微动疲劳夹具,在单轴伺服液压疲劳试验机上进行,轴向循环载荷 σ_{axial} 的频率 f 均为10 Hz, σ_{axial} 的应力比 r_σ 均为0,切向载荷 Q 的应力比 r_Q 均为-1。综合来看,此组的微动疲劳数据是在不同摩擦副半径($R=20\text{ mm}$ 、 50 mm 、 70 mm)和不同载荷条件(法向载荷 P 、轴向载荷 σ_{axial} 和切向载荷 Q)下得到的,比较具有代表性。

表2 Bellecave等^{[36]23-34}的微动疲劳试验数据

Tab. 2 Fretting fatigue test data from Bellecave et al.

试验	R/mm	$P/(\text{N/mm})$	$\sigma_{axial,max}/\text{MPa}$	$Q_{max}/(\text{N/mm})$	N_f
a-1	20	472.3	99.4	133.7	358 681
a-2	20	472.3	89.6	126.6	509 677
a-3	20	472.3	89.6	118.8	593 547
a-4	20	472.3	95.2	130.6	645 763
a-5	20	472.3	89.6	124.9	775 445
a-6	20	472.3	87.5	120.9	1 000 000

表3 Ferry等^{[26]23-31}的微动疲劳试验数据

Tab. 3 Fretting fatigue test data from Ferry et al.

试验	R/mm	$P/(\text{N/mm})$	$\sigma_{axial,max}/\text{MPa}$	$Q_{max}/(\text{N/mm})$	N_f
b-1	20	239.8	340	56.4	225 780
b-2	20	239.8	320	56.4	488 632
b-3	20	239.8	310	56.4	1 000 000
b-4	50	599.5	300	137.9	203 759
b-5	50	599.5	200	131.9	548 169
b-6	50	599.5	160	146.9	1 000 000
b-7	70	839.2	300	193.0	168 266
b-8	70	839.2	200	176.2	579 954
b-9	70	839.2	180	197.2	1 000 000

表4 Cardoso等^{[37]106087}的微动疲劳试验数据

Tab. 4 Fretting fatigue test data from Cardoso et al.

试验	R/mm	$P/(\text{N/mm})$	$\sigma_{axial,max}/\text{MPa}$	$Q_{max}/(\text{N/mm})$	N_f
c-1	70	839.2	225	285.3	153 047
c-2	70	839.2	300	193.0	207 185
c-3	70	839.2	225	285.3	261 871
c-4	70	839.2	230	184.6	473 954
c-5	70	839.2	200	176.2	579 954
c-6	70	839.2	150	272.7	671 534
c-7	70	839.2	180	180.4	1 000 000
c-8	70	839.2	120	264.3	1 000 000

2.2 面-面接触

第2组(G2)为Men等^{[35]109297}使用Ti-6Al-4V钛合金在面-面接触构型下得到的微动疲劳试验数据,试验详情和微动疲劳寿命结果如表5所示。Men等^{[35]109297}改进了Sabsabi等^[38]使用的类应力环型微动疲劳夹具,并进行了微动疲劳试验。摩擦副和试样的宽度均为10 mm,厚度均为5 mm。试验中,法向载荷 P 恒定为400 N/mm,循环轴向载荷 σ_{axial} 的应力比 r_σ 为-1,最大轴向载荷 $\sigma_{axial,max}$ 的范围在185~450 MPa。为了减轻夹具随动对寿命造成的影响, σ_{axial} 的频率在同一个试验中保持恒定,但随 $\sigma_{axial,max}$ 的增大而线性地从18 Hz降低到7.5 Hz。

表5 Men等^{[35]109297}的微动疲劳试验数据

Tab. 5 Fretting fatigue test data from Men et al.

试验	B/mm	$P/(\text{N/mm})$	$\sigma_{axial,max}/\text{MPa}$	N_f
d-1	10	400	450	21 628
d-2	10	400	400	38 013
d-3	10	400	350	52 144
d-4	10	400	300	109 119
d-5	10	400	250	164 761
d-6	10	400	225	293 378
d-7	10	400	212.5	467 292
d-8	10	400	200	3 668 103
d-9	10	400	185	10 000 000

2.3 材料性能

在使用PSM计算微动疲劳寿命的过程中,需要用到材料的一些基本力学性能参数和疲劳性能参数,用于有限元模拟、计算材料的临界距离与寿命的关系式[式(2)]和计算多轴疲劳准则输出值与寿命的关系式[式(1)]。

2.3.1 基本力学和疲劳性能

2组Ti-6Al-4V的基本力学性能稍有不同,具体如

表 6 所示。其中, Ti-6Al-4V¹ 为第 1 组 (G1) 中所用的钛合金, 其参数来源于文献 [28]¹⁰⁵⁵⁰⁴、文献 [37]¹⁰⁶⁰⁸⁷; Ti-6Al-4V² 为第 2 组 (G2) 中所用的钛合金, 其参数来源于文献 [28]¹⁰⁵⁵⁰⁴、文献 [35]¹⁰⁹²⁹⁷。需要说明的是, 表 6 中的参数主要来源于引文文献, 引文文献中没有的性能参数使用了其他文献中相同材料的性能参数进行了补充。表 6 中, μ 为摩擦因数。

表 6 材料的基本力学性能参数

Tab. 6 Basic mechanical property parameters of materials

材料	E/GPa	ν	σ_y/MPa	σ_{ut}/MPa	$K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	μ
Ti-6Al-4V ¹	120	0.29	910	980	66	0.5
Ti-6Al-4V ²	118	0.3	940	985	66	0.5

所用的 2 组 Ti-6Al-4V 采用了相同的疲劳性能参数进行计算, 具体如表 7^{[37]106087[39]} 所示。同样, 表 7 中的参数主要来源于引文文献, 并使用了其他文献中相同材料的性能参数进行了补充。表 7 中, σ_r 为应力比 r 下的单轴疲劳极限; r_c 为单轴疲劳极限对应的应力比; N_c 为单轴疲劳极限对应的循环次数。需要说明的是, 由于缺乏相关材料的剪切疲劳极限, 使用 $\tau_r = \sigma_r / \sqrt{3}$ 对其进行近似计算^{[30]106895}, 且认为 τ_r 和 ΔK_{th} 对应的应力比和循环次数与 σ_r 相同。

表 7 材料的疲劳性能参数

Tab. 7 Fatigue performance parameters of the material

材料	σ'_f/MPa	b	σ_r/MPa	τ_r/MPa	$\Delta K_{th}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	r_c	N_c
Ti-6Al-4V	2 030	-0.104	382	221	5.5	-1	10^6

2.3.2 临界距离与寿命的关系式

本文中, 临界距离 L_M 与寿命 N_f 的关系式是通过结合式 (3) 与式 (4) 得到的。由于 2 组 Ti-6Al-4V 的疲劳性能相同, 计算得到的 L_M - N_f 关系式也相同, 即

$$L_M(N_f) = 1.4(N_f)^{-0.28} \quad (5)$$

式中, L_M 为临界距离。

2.3.3 多轴疲劳准则与寿命关系式

结合第 2.3.1 节中的材料基本力学性能和疲劳性能参数, 使用表 1 中各多轴疲劳准则的模型方程, 可得到材料的多轴疲劳准则输出值与寿命的关系式, 如表 8 所示。需要说明的是, 在前 3 个准则中, 由于缺少 D_{FDP} - N_f 关系式中的常数 k , 使用 $k \approx \sigma_y / \sigma'_f$ ^[40] 进行近似。对于 FP 准则, 取 $k = 0.35$ ^{[12]955-964}。

3 有限元模型

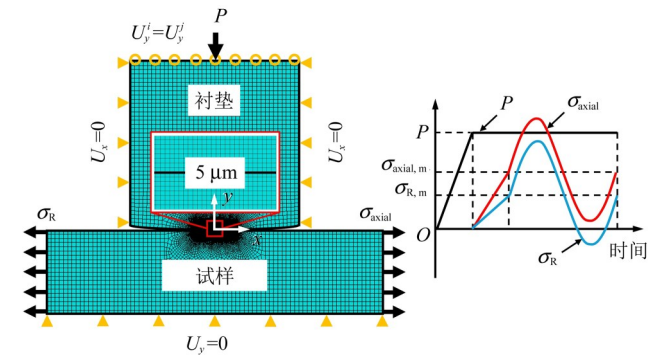
在使用 PSM 预测微动疲劳寿命时, 需要通过 FE 法计算微动加载过程中试样的应力分布和变化, 然后通过后处理提取应力, 从而计算寿命。使用 Abaqus 软件建立二维 FE 模型, 并计算应力, 并使用 Python 脚本

进行后处理, 计算微动疲劳寿命。

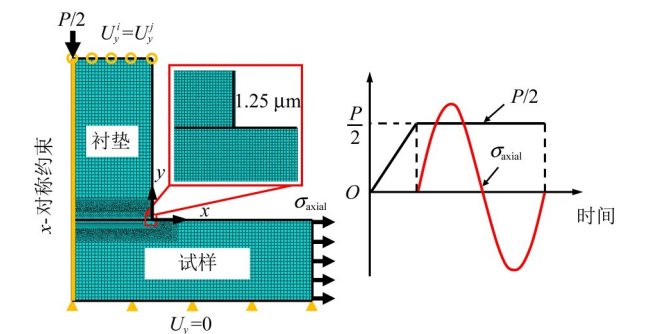
表 8 材料的 D - N_f 关系式Tab. 8 D - N_f relation formula of materials

模型方程	Ti-6Al-4V ¹	Ti-6Al-4V ²
$D_{SWT} = g(N_f)$	$D_{SWT} = 29.7(N_f)^{-0.208}$	$D_{SWT} = 30.2(N_f)^{-0.208}$
$D_{FS} = g(N_f)$	$D_{FS} = 0.0203(N_f)^{-0.104} + 0.00945(N_f)^{-0.208}$	$D_{FS} = 0.0209(N_f)^{-0.104} + 0.00968(N_f)^{-0.208}$
$D_{MD} = g(N_f)$	$D_{MD} = 1051(N_f)^{-0.104}$	$D_{MD} = 1050(N_f)^{-0.104}$
$D_{FP} = g(N_f)$	$D_{FP} = 1275(N_f)^{-0.104}$	$D_{FP} = 1275(N_f)^{-0.104}$

对于图 3(a) 所示的柱-面微动构型和加载条件, 目前有 3 种建模方法, 分别为: ① 通过对类弹簧部件施加切向载荷 Q , 建立有限元模型^[41]; ② 通过对试样施加反作用轴向载荷 σ_R , 从而间接施加 Q , 建立有限元模型^[42]; ③ 直接对摩擦副施加 Q , 建立有限元模型^[43]。本文使用第 2 种建模方法来建立二维柱-面有限元模型, 其模型和载荷条件如图 4(a) 所示。



(a) 柱-面接触构型下的有限元模型和加载条件



(b) 面-面接触构型下的有限元模型和加载条件

图 4 不同接触构型下微动疲劳试验的有限元模型和加载条件

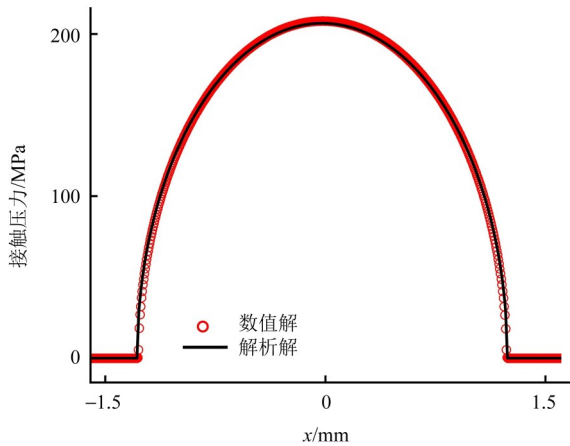
Fig. 4 Finite element models and load conditions for fretting fatigue tests with different contact configurations

在有限元模型的材料模块中, 使用线弹性材料模型, 相关材料的弹性模量 E 和泊松比 ν 如表 6 所示。单元类型为 4 节点双线性平面应变的四边形单元 (CPE4), 对试样和摩擦副接触面附近的单元进行细化, 细化单元的尺寸为 $5 \mu\text{m}$ 。对试样的上表面和摩擦副的下表面设置接触约束, 接触约束类型为表面-表面

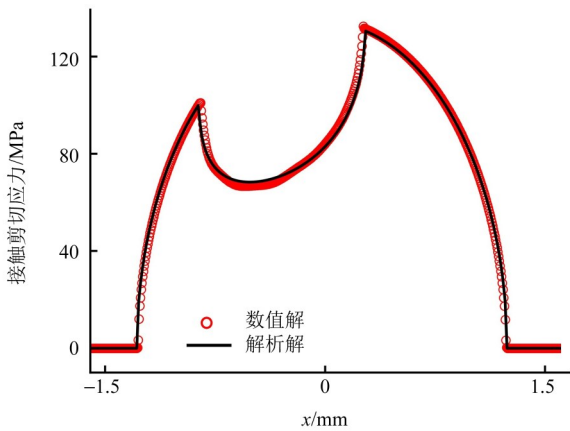
相互作用,其中,将试样的上表面设置为主面,将摩擦副的下表面设置为从面。对试样的下边缘施加 y 方向的位移约束 $U_y = 0$ 。对摩擦副的左、右两边缘施加 x 方向的位移约束 $U_x = 0$,对试样上边缘的节点施加方程约束,保证上边缘节点在 y 方向上的位移相同。加载分3步进行:第1步,对摩擦副中间节点施加法向载荷 P ,并在第2步和第3步中保持恒定;第2步,在试样的右边缘和左边缘同时施加轴向载荷 σ_{axial} 和反作用轴向载荷 σ_R ,分别加载到平均应力 $\sigma_{\text{axial},m}$ 和 $\sigma_{R,m}$,其中,反作用轴向载荷 σ_R 的计算式为

$$\sigma_R = \sigma_{\text{axial}} - \frac{Q}{A_s} \quad (6)$$

式中, A_s 为图4(a)中试样的横截面面积;第3步,在试样的左、右两边缘分别同时施加 σ_R 和 σ_{axial} (循环应力)。需要说明的是,对于应力比为-1的模型,其平均应力为0,第2步可省去。使用第1组试验中的a-10这一微动条件对有限元模型进行验证,结果如图5所示。由图5可知,有限元数值解基本符合解析解。



(a) 接触压力



(b) 接触剪切应力

图5 柱-面接触构型(试验a-10)接触面应力分布的数值结果和解析结果的比较

Fig. 5 Comparison of analytical and numerical results of stress distribution at the contact surface for the cylinder-on-flat contact configuration (test a-10)

对于面-面接触构型,由于其对称性,采用1/4有限元模型,模型和加载条件如图4(b)所示。单元类型为CPE4,对接触边缘的单元网格进行细化,细化尺寸为 $1.25 \mu\text{m}$ 。试样和摩擦副的接触约束与柱-面接触构型相同。对试样和摩擦副的左边施加 x -对称约束,对试样下边缘施加 y 方向上的位移约束,对摩擦副的上边缘节点施加方程约束,保证上边缘节点在 y 方向上的位移相等。分2步进行加载:第1步,在摩擦副的左上顶点施加法向载荷 $P/2$,并在第2步保持恒定;第2步,对试样的右边缘施加循环轴向载荷 σ_{axial} 。需要说明的是,在微动载荷下,面-面接触构型的接触面边缘为应力奇异点,细化网格的尺寸将影响应力大小。不过,在使用TCD法计算微动疲劳寿命时,网格大小对寿命计算结果的影响不大^{[35]109297}。

4 结果和分析

通过有限元法对2组微动疲劳情况进行模拟计算,并使用PSM对模拟结果进行后处理,计算相应的微动疲劳寿命。计算时,预测寿命路径的角度 θ 的变化范围在 $-90^\circ \sim 90^\circ$,角度间隔为 1° 。

4.1 数值计算结果

图6所示为柱-面接触构型(G1)的计算结果。由图6可知,在此组微动疲劳条件下,由4个多轴疲劳准则计算得到的预测寿命区间($[N_{f,\min}^{\text{pre}}, N_{f,\max}^{\text{pre}}]$)和预测寿命范围($\Delta N_f^{\text{pre}} = N_{f,\max}^{\text{pre}} - N_{f,\min}^{\text{pre}}$)均有所不同。其中,SWT和FP准则的预测寿命区间分布相似,但SWT准则的预测寿命范围 ΔN_f^{pre} 略小,而最小预测寿命 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 较大。FS和MD准则的预测寿命区间分布相似,但FS准则的预测寿命范围 ΔN_f^{pre} 较大,而 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 较小。由4个准则计算得到的 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 基本上都在 $\pm 3N_f$ 疲劳分散带内,而最大预测寿命 $N_{f,\max}^{\text{pre}}$ 和垂直路径寿命 $N_{f,0}^{\text{pre}}$ 基本相同,且除FP准则外,由其余3个准则计算得到的 $N_{f,\max}^{\text{pre}}$ 和 $N_{f,0}^{\text{pre}}$ 大部分超出了分散带。因此,选择寿命最短的路径作为使用点法计算寿命的路径,可以比较准确地预测此组微动疲劳条件下试样的寿命。此外,由于由不同准则计算得到的 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 的大小不同,使用SWT和MD准则计算得到的寿命较不保守,使用FP准则计算得到的寿命较保守,使用FS准则计算得到的寿命介于这2种情况之间。

对于面-面接触构型(G2),通过结合Basquin方程得到的 $D_{\text{FDP}}-N_f$ 关系式,对该组的微动疲劳数据重新进行了计算,结果与文献^{[35]109297}基本相同,如图7所示。由图7可知,由FS、MD和FP准则得到的 ΔN_f^{pre} 略有不同。

同,但 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 基本相同,且当 $N_f < 10^6$ 时, $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 都在 $\pm 3N_f$ 疲劳分散带内;当 $N_f > 10^6$ 时, $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 在分散带外,且短于试验寿命。相比之下,由 SWT 准则得到的 ΔN_f^{pre} 较小、 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 较大,且当 $N_f < 10^6$ 时, $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 在 $\pm 3N_f$ 疲劳分散带外,且长于试验寿命;当 $N_f > 10^6$ 时, $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 在分散带

内。总体而言,对于 Ti-6Al-4V 在此微动疲劳条件下的中、低周寿命预测 ($N_f < 10^6$), FS、MD 和 FP 准则均比较适用,且最合适的寿命预测路径依然是预测寿命最短的路径。此外,相较于柱-面接触构型 (G1) 的寿命预测结果, G2 组的 $N_{f,\max}^{\text{pre}}$ 和 $N_{f,0}^{\text{pre}}$ 相差较大。

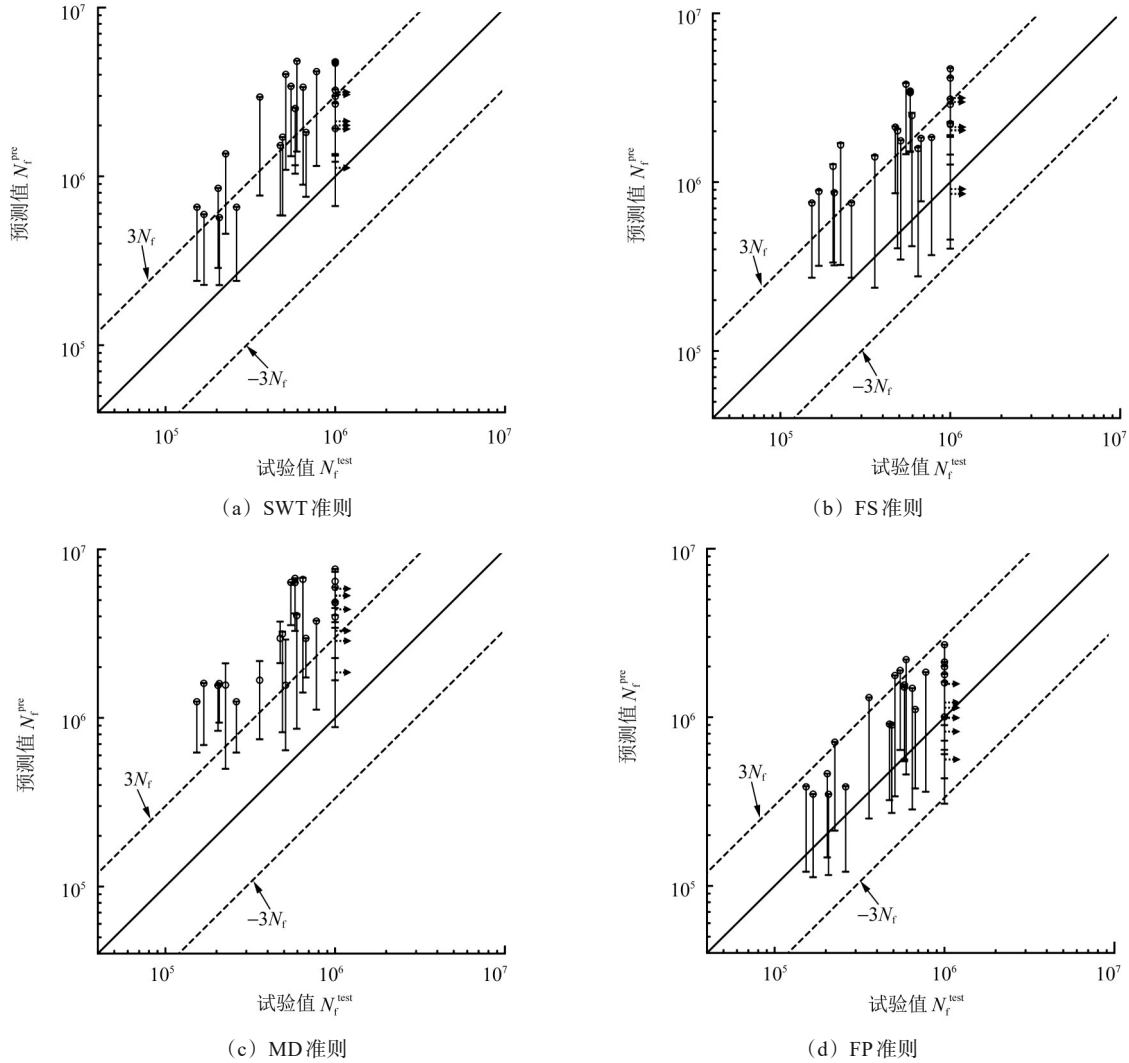


图 6 柱-面接触构型中,由不同的多轴疲劳准则得到的预测寿命 N_f^{pre} 与试验寿命 N_f^{test} 的关系

Fig. 6 Relation between predicted life N_f^{pre} obtained by different multiaxial fatigue criteria and test life N_f^{test} for cylinder-on-flat contact configuration

综上所述,在不同接触构型、样品尺寸和加载条件等微动疲劳条件下,由点法结合 4 种多轴疲劳准则得到的预测寿命范围存在一定差异,但通过 PSM 计算得到的最短预测寿命 $N_{f,\min}^{\text{pre}}$ 均与试验寿命比较相符。因此,预测寿命最短的路径适合作为点法的寿命计算路径,用于 Ti-6Al-4V 在不同微动疲劳条件下寿命预测。

4.2 分析

在第 4.1 节中,对比不同接触构型下的预测寿命区间发现,在柱-面接触构型下, $N_{f,0}^{\text{pre}}$ 与 $N_{f,\max}^{\text{pre}}$ 接近,而在面-面接触构型下,两者则相差较多。下面对此现象进行深入分析。

本节选择柱-面接触构型的试验 a-10 和面-面接触构型的试验 d-8 进行分析。通过后处理,计算了这 2 种微动疲劳条件下的 SWT 值 D_{SWT} 的分布,结果分别如图 8、图 9 所示。

使用 PSM 计算了 SWT 准则下的预测寿命区间,结果如图 10 所示。

由图 8 可知,在柱-面接触构型下,热点周围的 D_{SWT} 分布几乎是关于沿热点的垂直路径 ($\theta = 0^\circ$) 对称的,且满足

$$D_{\text{SWT}}(r', \theta = 0^\circ) < D_{\text{SWT}}(r', \theta), \forall \theta \neq 0^\circ \quad (7)$$

式中, r' 为与热点的距离。

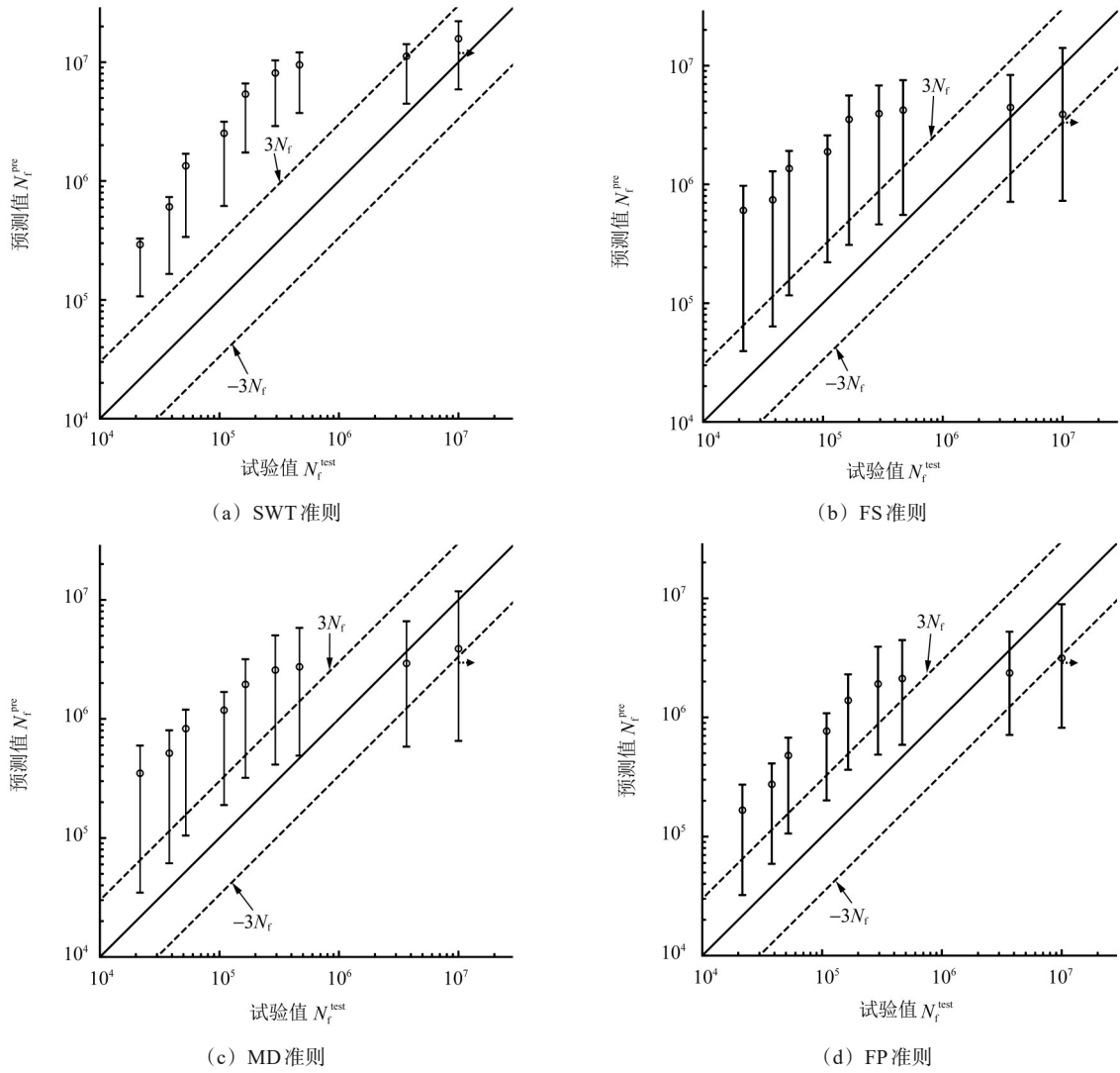


图7 面-面接触构型中,由不同的多轴疲劳准则得到的预测寿命 N_f^{pre} 与试验寿命 N_f^{test} 的关系

Fig. 7 Relation between predicted life N_f^{pre} obtained by different multiaxial fatigue criteria and test life N_f^{test} for flat-on-flat contact configuration

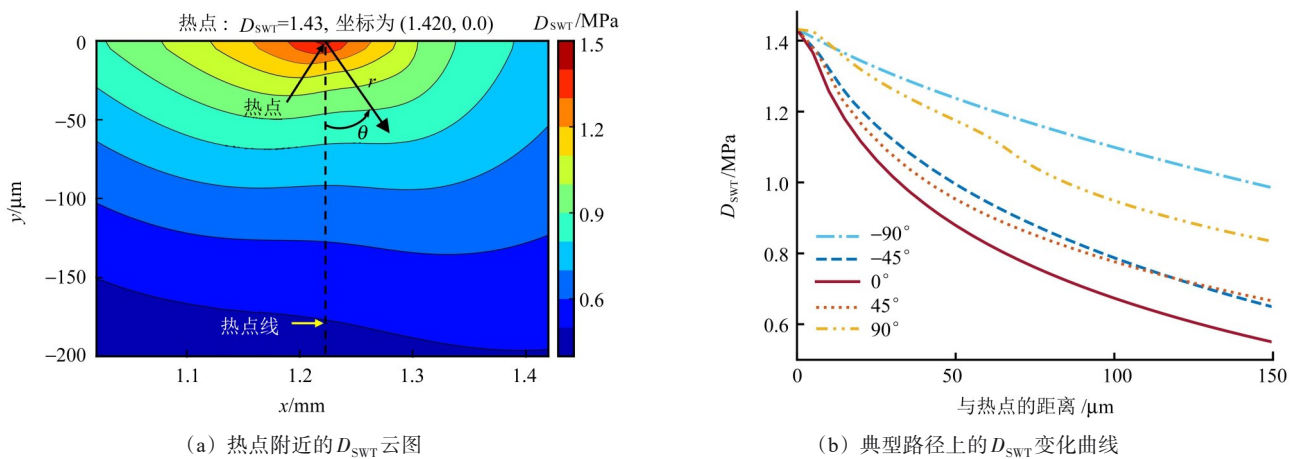


图8 柱-面接触构型(a-10)试件热点附近的 D_{SWT} 云图和典型路径上的 D_{SWT} 变化曲线

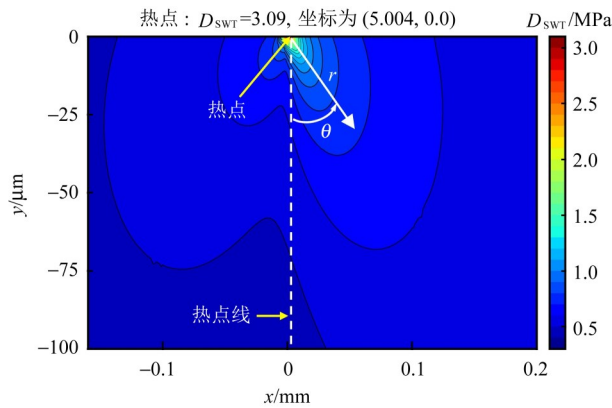
Fig. 8 Contour plots of D_{SWT} near the hot spot and variation curves of D_{SWT} along typical paths for specimens with cylinder-on-flat contact configuration (a-10)

这种分布基本与缺口疲劳中的疲劳损伤参数分布相同^{[35]109297}。因此,预测寿命最长的路径与垂直路径重合,即最长预测寿命 $N_{f,max}^{pre}$ 与垂直路径的寿命 $N_{f,0}^{pre}$

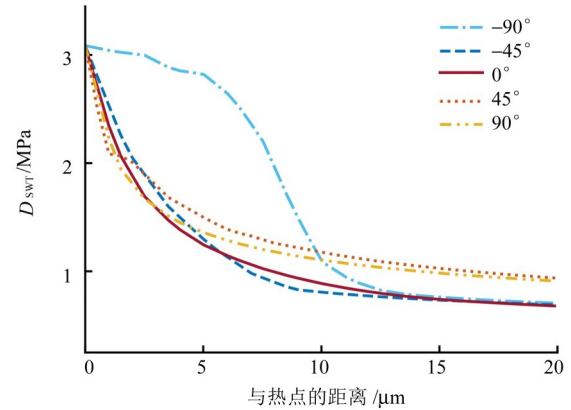
相同。这一点可以通过由迭代计算得到的寿命预测结果[图10(a)]证实。图10中, L_M^{max} 、 L_M^{min} 、 L_M^0 分别为 θ 取最大值 θ^{max} 、最小值 θ^{min} 和 θ^0 (即 0°)时的临界距离。此

外,由图 10(a)可知,在试验 a-10 的微动疲劳条件下,

最短预测寿命 $N_{f, \min}^{\text{pre}}$ 是在 $\theta = -90^\circ$ 的水平路径得到的。



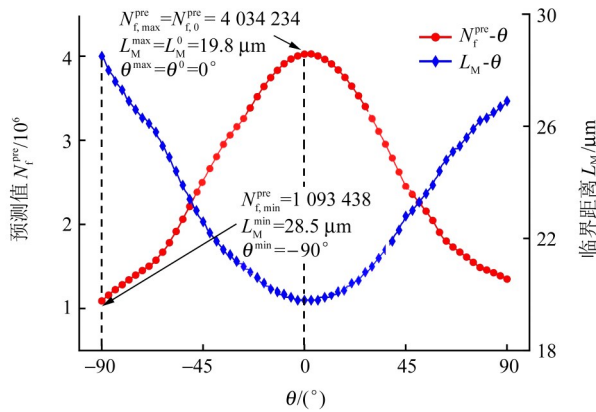
(a) 热点附近的 D_{SWT} 云图



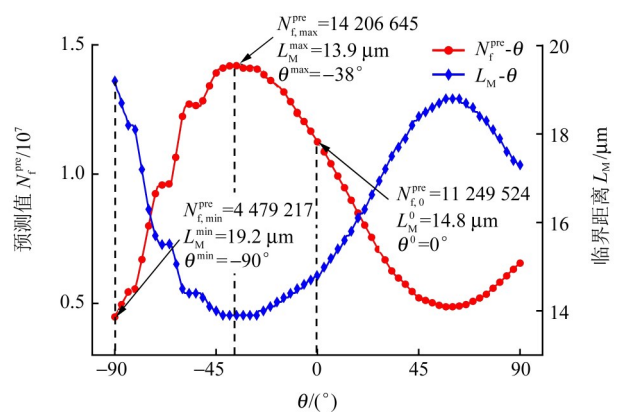
(b) 典型路径上的 D_{SWT} 变化曲线

图 9 面-面接触构型(d-8)试件热点附近的 D_{SWT} 云图和典型路径上的 D_{SWT} 变化曲线

Fig. 9 Contour plots of D_{SWT} near the hot spot and variation curves of D_{SWT} along typical paths for specimens with flat-on-flat contact configuration (d-8)



(a) 柱-面接触构型(试验 a-10)



(b) 面-面接触构型(试验 d-8)

图 10 预测寿命 N_f^{pre} 和临界距离 L_M 随路径角度 θ 的变化

Fig. 10 Variations of the predicted life N_f^{pre} and the critical distance L_M with the path angle θ

在面-面接触构型试验 d-8 的微动疲劳条件下, D_{SWT} 分布[图 9(a)]并不对称,且不满足式(7)。由通过迭代计算得到的寿命预测结果[图 10(b)]可知,最长预测寿命 $N_{f, \max}^{\text{pre}}$ 是在 $\theta = -38^\circ$ 得到的,最短预测寿命 $N_{f, \min}^{\text{pre}}$ 是在 $\theta = -90^\circ$ 的水平路径得到的。需要注意的是,尽管试验 a-10 和 d-8 的最短预测寿命均是在 $\theta = -90^\circ$ 的路径得到的,但是在其他载荷条件和疲劳准则下,预测寿命最短的路径的角度可能会发生改变,这正是用 PSM 预测微动疲劳寿命的一个重要优势。

5 结论

为验证 PSM 在 Ti-6Al-4V 钛合金微动疲劳寿命预测中的适用性,分析了 Ti-6Al-4V 在不同接触构型、样品尺寸和载荷条件下的 2 组微动疲劳数据,通过有限元模拟和后处理分析,验证用 PSM 进行寿命预测的准

确性。得到的主要结论如下:

1) 通过点法,结合 4 种不同的多轴疲劳准则 (SWT、FS、MD 和 FP),计算了沿热点不同路径上的预测寿命,得到了预测寿命区间 $[N_{f, \min}^{\text{pre}}, N_{f, \max}^{\text{pre}}]$,并将其与试验寿命进行了比较。结果表明,对于 2 组不同微动疲劳条件,由不同多轴疲劳准则计算得到的 $N_{f, \min}^{\text{pre}}$ 均与试验寿命接近。因此,可将通过 PSM 选择的预测寿命最短的路径作为点法的寿命预测路径,其不仅适用于 Ti-6Al-4V 在面-面接触构型下的微动疲劳寿命预测,还适用于其他微动疲劳条件下的寿命预测。

2) 在柱-面接触构型和面-面接触构型这 2 种微动疲劳条件下,损伤参数的分布存在差异,导致由计算得到的寿命随路径变化的趋势有所不同。因此,预测寿命最短的路径的角度可能会随着微动疲劳条件的变化而发生改变。

参考文献(References)

- [1] Oku Y, Sugino M, Ando Y, et al. Fretting fatigue on thread root of premium threaded connections[J]. Tribology International, 2017, 108:111-120.
- [2] Jiménez-Peña C, Talemi R H, Rossi B, et al. Investigations on the fretting fatigue failure mechanism of bolted joints in high strength steel subjected to different levels of pre-tension[J]. Tribology International, 2017, 108:128-140.
- [3] Bertini L, Santus C. Fretting fatigue tests on shrink-fit specimens and investigations into the strength enhancement induced by deep rolling[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 81:179-190.
- [4] Ding J, Mccoll I R, Leen S B. The application of fretting wear modelling to a spline coupling[J]. Wear, 2007, 262(9/10):1205-1216.
- [5] Cruzado A, Urchegui M A, Gómez X. Finite element modeling and experimental validation of fretting wear scars in thin steel wires[J]. Wear, 2012, 289:26-38.
- [6] Azevedo C R F, Henriques A M D, Filho A R P, et al. Fretting fatigue in overhead conductors: rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1):136-151.
- [7] Yang Q, Zhou W L, Zhong Y N, et al. Effect of shot-peening on the fretting wear and crack initiation behavior of Ti-6Al-4V dovetail joint specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 107:83-95.
- [8] 张育轩, 李欣, 杨建伟, 等. 交变法向载荷作用下 2024 铝合金的微动疲劳试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(4):962-969.
- Zhang Yuxuan, Li Xin, Yang Jianwei, et al. Experimental study on fretting fatigue of 2024 aluminum alloy under alternating normal load[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4):962-969. (In Chinese)
- [9] Szolwinski M P, Farris T N. Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy[J]. Wear, 1998, 221(1):24-36.
- [10] Lykins C D, Mall S, Jain V. An evaluation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(8):703-716.
- [11] Lykins C D, Mall S, Jain V. A shear stress-based parameter for fretting fatigue crack initiation[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001, 24(7):461-473.
- [12] Namjoshi S A, Mall S, Jain V K, et al. Fretting fatigue crack initiation mechanism in Ti-6Al-4V[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2002, 25(10):955-964.
- [13] Navarro C, Muñoz S, Domínguez J. On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(1):32-44.
- [14] Li X, Zuo Z X, Qin W J. A fretting related damage parameter for fretting fatigue life prediction[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 73:110-118.
- [15] Dini D, Nowell D, Dyson I N. The use of Notch and short crack approaches to fretting fatigue threshold prediction: theory and experimental validation[J]. Tribology International, 2006, 39(10):1158-1165.
- [16] Araújo J A, Susmel L, Taylor D, et al. On the use of the theory of critical distances and the modified wöhler curve method to estimate fretting fatigue strength of cylindrical contacts[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(1):95-107.
- [17] Neuber H. Theory of notch stresses: principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1958:76-98.
- [18] Susmel L. Multiaxial Notch fatigue: from nominal to local stress/strain quantities[M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd., 2009:83-95.
- [19] Susmel L. The theory of critical distances: a review of its applications in fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(7):1706-1724.
- [20] Wang J K, Yang X G. HCF strength estimation of notched Ti-6Al-4V specimens considering the critical distance size effect[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 40:97-104.
- [21] 徐友坤, 鲁连涛, 曾东方, 等. 基于临界距离法的含表面缺陷车轴试样疲劳强度预测[J]. 机械强度, 2022, 44(4):825-830.
- Xu Youkun, Lu Liantao, Zeng Dongfang, et al. Fatigue strength prediction of railway axle specimen with surface notch by TCD[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4):825-830. (In Chinese)
- [22] 廖鼎, 朱顺鹏, 高杰维, 等. 耦合临界平面-临界距离理论的缺口结构疲劳寿命预测[J]. 机械强度, 2023, 45(2):454-461.
- Liao Ding, Zhu Shunpeng, Gao Jiewei, et al. Fatigue life prediction of notched structure using combined critical plane-critical distance approach[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2):454-461. (In Chinese)
- [23] Giannakopoulos, Suresh, Chenut. Similarities of stress concentrations in contact at round punches and fatigue at notches: implications to fretting fatigue crack initiation[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2000, 23(7):561-571.
- [24] Araújo J A, Susmel L, Taylor D, et al. On the prediction of high-cycle fretting fatigue strength: theory of critical distances vs. hot-spot approach[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(7):1763-1778.
- [25] Araújo J A, Susmel L, Pires M S T, et al. A multiaxial stress-based critical distance methodology to estimate fretting fatigue life[J]. Tribology International, 2017, 108:2-6.
- [26] Ferry B, Araújo J A, Pommier S, et al. Life of a Ti-6Al-4V alloy under fretting fatigue: study of new nonlocal parameters[J]. Tribology International, 2017, 108:23-31.
- [27] Kouanga C T, Jones J D, Revill I, et al. On the estimation of finite lifetime under fretting fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112:138-152.
- [28] Araújo J A, Castro F C, Matos I M, et al. Life prediction in multiax-

- ial high cycle fretting fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105504.
- [29] Zabala A, Infante-García D, Giner E, et al. On the use of the theory of critical distances with mesh control for fretting fatigue lifetime assessment[J]. *Tribology International*, 2020, 142: 105985.
- [30] Nesládek M, Pacetti L, Papuga J. Validation of fatigue criteria under fretting fatigue conditions [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 161: 106895.
- [31] Infante-García D, Zabala A, Giner E, et al. On the use of the theory of critical distances with mesh control for fretting fatigue life assessment in complete and nearly complete contacts[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103476.
- [32] Vantadori S, Fortese G, Ronchei C, et al. A stress gradient approach for fretting fatigue assessment of metallic structural components[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 101: 1-8.
- [33] Rangel D, Erena D, Vázquez J, et al. Prediction of initiation and total life in fretting fatigue considering kinked cracks[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 119: 103345.
- [34] Araújo J A, Almeida G M J, Ferreira J L A, et al. Early cracking orientation under high stress gradients: the fretting case[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 100: 611-618.
- [35] Men H J, Zhou W L, Huang H, et al. Study of the point method for fretting fatigue life prediction[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 275: 109297.
- [36] Bellecave J, Pommier S, Nadot Y, et al. T-stress based short crack growth model for fretting fatigue [J]. *Tribology International*, 2014, 76: 23-34.
- [37] Cardoso R A, Ferry B, Montebello C, et al. Study of size effects in fretting fatigue[J]. *Tribology International*, 2020, 143: 106087.
- [38] Sabsabi M, Giner E, Fuenmayor F J. Experimental fatigue testing of a fretting complete contact and numerical life correlation using X-FEM [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33 (6) : 811-822.
- [39] Dowling N E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue* [M]. 4th ed. London: Pearson Education Ltd., 2012: 753.
- [40] Giner E, Navarro C, Sabsabi M, et al. Fretting fatigue life prediction using the extended finite element method [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53 (3) : 217-225.
- [41] Tsai C T, Mall S. Elasto-plastic finite element analysis of fretting stresses in pre-stressed strip in contact with cylindrical pad [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2000, 36 (2) : 171-187.
- [42] Hojjati-Talemi R, Wahab M A. Fretting fatigue crack initiation lifetime predictor tool: using damage mechanics approach [J]. *Tribology International*, 2013, 60: 176-186.
- [43] Cardoso R A, Doca T, Néron D, et al. Wear numerical assessment for partial slip fretting fatigue conditions [J]. *Tribology International*, 2019, 136: 508-523.

Prediction of fretting fatigue life of Ti-6Al-4V titanium alloy based on path selection method

MEN Haojie¹ NIU Zhiqiang¹ DENG Ying² ZHOU Wenlong¹ CHEN Guoqing¹ FU Xuesong¹ GAI Pengtao²

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: [Objective] Fretting fatigue widely occurs in numerous engineering components and can drastically reduce their service life. Due to the complexity of fretting fatigue problems, a universal fatigue life prediction method applicable to diverse fretting fatigue loading conditions has not yet been established. It is essential to verify the applicability of the path selection method (PSM), which integrates the point approach and multiaxial fatigue criteria, for predicting the fretting fatigue life of Ti-6Al-4V under various fretting fatigue conditions. [Methods] Two sets of fretting fatigue test data of Ti-6Al-4V alloy under cylinder-on-flat and flat-on-flat contact configurations were adopted. The PSM integrated with four types of multiaxial fatigue criteria was employed to predict fretting fatigue life, and the predicted results were compared and analyzed against test data. [Results] The results reveal that taking the path with the minimum predicted life screened by the PSM as the life prediction path of the point method is valid for fretting fatigue life prediction of Ti-6Al-4V alloy under flat-on-flat contact configuration, and can also accurately estimate fatigue life under other fretting loading conditions.

Key words: Fretting fatigue; Life prediction; Theory of critical distance; Multiaxial fatigue; Path selection method

Corresponding author: ZHOU Wenlong, E-mail: wlzhou@126.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975084); National Science and Technology Major Project (J2019-IV-0012-0080)

Received: 2024-12-03

(编辑: 刘星泽)